水稻精準農業體系
由植被高解析反射光譜模式化稻株生長
13-24, 2003

由植被高解析反射光譜模式化稻株生長

楊純明*、陳榮坤
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要 ---------- 14
一、前言 ---------- 14
二、方法簡述 ---------- 15
三、結果與討論 ---------- 17
四、結語 ---------- 21
五、誌謝 ---------- 21
六、引用文獻 ---------- 22
ABSTRACT ---------- 24

由植被高解析反射光譜模式化稻株生長

楊純明*、陳榮坤
行政院農業委員會農業試驗所農藝組
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

摘要

本文研究旨在探討近地面量測之水稻植被高解析反射光譜之季節變化，並試以利用不同方法來篩檢估測水稻生長的光譜特徵並建立光譜遙測模式。高解析光譜係以田間攜帶式高解析輻射光譜儀偵測，生長性狀則於量測光譜時取樣調查，試驗期間爲 2000-2002 年之一、二期稻作，計有四期作。篩檢之光譜特徵爲可見光之綠光波段峰點(GREEN)、紅光波段之谷點(RED)及近紅外光之波段頂點(NIR)，而光譜指數係由此三項動態特徵之反射比計算，包括 R_{RED}/R_{NIR} ratio、R_{GREEN}/R_{NIR} ratio、R_{RED}/R_{GREEN} ratio 及 NDVI(normalized difference vegetation index, 標準差植被指數或稱正規差植生指數)。試驗發現稻株之生長性狀於抽穗前後達到最高點，再隨著成熟老化而下降。據此，將水稻生育全期以抽穗爲分割點劃分爲抽穗前期(pre-heading phase)及抽穗後期(post-heading phase)，可提高光譜特徵及光譜指數與生長性狀間之相關性。又由多元直線複迴歸(MLR)分析，可經由對決定係數(coefficient of determination, R^2)的要求，來選取光譜中合適的光譜特徵波段數目以建立多元直線複迴歸模式估測稻株之生長。根據研究結果，多元直線複迴歸模式確實提供了選取光譜特徵的彈性，同時也改進了對稻株生長變異的估測。

關鍵詞： 高解析反射比光譜、水稻生長模式化、直線複迴歸、光譜特徵、光譜指數。

一、前言

遙測技術的優點之一，在於能夠提供相當準確與精確的大面積被測地表物件的即時狀態資料，俾於即時或及時評估而採行適當的因應對策(Barrett and Curtis, 1982)，具有實用的經營管理功效。在農作物生產管理流程上，運用遙測技術之前必先熟知農作物植被的光譜性質，釐清外觀物理徵狀有關的光譜特徵波段，並建立估測的光譜遙測模式(Gates *et al.*, 1965; Gausman *et al.*, 1969, 1971; Rouse *et al.*, 1974; Tucker *et al.*, 1979; Wiegand *et al.*, 1991; Wooley, 1971; Yang and Su, 1997)。自從美國大地衛星 Landsat 於 1972 年發射及後續資源衛星升空從事商業運轉以來，針對衛星波段和地物關係的研究及應用與日俱增，由於早期的衛星多以寬頻感測器爲主，因此光譜指數的發展獲得普遍的認同及採用。光譜指數通常選用 1-3 個特徵波段，依波段代表的物理化學意義組合成邏輯運算式，用以連結作物植被的外觀徵狀而賦予估測與追蹤的功能(Anderson and Hanson, 1992; Baret and Guyot, 1991; Clevers, 1986; Elvidge and Chen, 1995; Gilabert *et al.*, 1996; Huete, 1988; Price, 1992; Price and Bausch, 1995; Wiegand *et al.*, 1990)。這些基於

波段比值所建立的光譜指數，例如NDVI(Rouse *et al.*, 1974)及SAVI(soil-adjusted vegetation index，土壤校正植被指數)(Huete, 1988)，因具有降低光源背景干擾的作用而廣受歡迎，其資料的取得與計算簡便易行。

近幾年高解析資源衛星資料也邁入商業化，更加開拓了遙測技術的視野與應用層面，同時大幅促進了高解析光譜的研究探討。許多統計方法被利用來分析被測物的反射光譜，以嘗試結合更多的光譜特徵波段來萃取光譜資訊及提高估測的準確度，增進辨識與判別的功能(Wanjura and Hatfield, 1987)。例如藉由複迴歸分析，研究發現由多個光譜特徵波段構成的多元直線複迴歸模式(MLR, multiple linear regression model)，可以彈性的篩檢有關的光譜特徵波段，因而提供了較佳的光譜訊息及估測準確度(Lawrence and Ripple, 1998; Shibayama and Akiyama, 1991; Thenkabail *et al.*, 2000)。惟儘管如此，由於農作物在生育過程中會受到環境與栽培管理措施的影響而改變植被反射光譜，因此應當究明收錄於多元直線複迴歸模式的光譜特徵是否依然能夠於外在因子影響下恰如其份的反應作物生長狀態(Thenkabail *et al.*, 2000)。又這些光譜特徵之間若未予相關程度的檢定與區分，可能存在共線性(collinearity)問題，而產生過度最佳化(over fitting)現象，高估了MLR模式的適用性(Blackburn, 1998; Thenkabail *et al.*, 2000)。所以，在利用高解析光譜進行多元複迴歸分析時，應當審慎篩檢最合適的光譜特徵波段組合，才能避免額外的選取，獲得對性狀估測的實際改進。

本研究以臺灣地區最主要的糧食作物—水稻爲試驗對象，由近地面高解析植被反射光譜及生長性狀的定期追蹤量測，篩檢出光譜特徵波段，並由光譜指數及多元直線複迴歸分析方法比較對稻株生長估測的優劣。

二、方法簡述

本研究田間試驗於2000-2002年兩期稻作期間在臺中縣霧峰鄉行政院農業委員會農業試驗所農場(TARI, 24°45'N, 120°54'E, elevation of 60 m)實施，以進行對水稻植被高解析光譜及生長性狀的定期追蹤量測。參試水稻(*Oryza sativa*)品種爲臺農67號，每叢3-5株，行株距0.3 m × 0.18 m，族群密度185,000 hills ha^{-1}。本研究分爲二項試驗，試驗一計有四期稻作，主要目的在建立光譜特徵與生長性狀間之遙測模式。其中，一期稻作分別於2000年2月18日及2002年2月27日插秧，於2000年6月16日及2002年6月25日收穫；二期稻作則分別於2000年8月5日及2001年8月3日插秧，而於2000年12月6日及2001年11月26日收穫。

試驗田區劃分爲20小區，每小區約0.5 ha，土壤酸鹼值從4.46至5.73不等，有機質含量範圍介於1.10%至2.11%之間。移植前5-7天施用臺肥39號複合肥料($N:P_2O_5:K_2O$=12%:18%:12%，臺灣肥料公司，高雄市)300 kg ha^{-1}爲基肥，第一次追肥於移植後1週(二期作)或2週(一期作)施用臺肥1號複合肥料($N:P_2O_5:K_2O$=20%:5%:10%，臺灣肥料公司，高雄市)100 kg ha^{-1}，第二次追肥以臺肥1號複合肥料200 kg ha^{-1}於移植後3週(二期作)或4週(一期作)施用，抽穗前20天施用硫銨(21% N，臺灣肥料公司，高雄市)160 kg ha^{-1}爲穗肥。農藥使用依照前臺灣省政府農林廳出版之植物保護手冊(Plant Protection Manual, 1994)推薦用藥及用量操作，除草劑丁基拉草(butachlor，5%granule，30 kg ha^{-1})於插秧後一週內施用，本達隆溶液(bentazon，44.1%solution，200X，3 L ha^{-1})於插秧後3週施用；另以殺蟲劑6％培丹粒劑(cartap，30 kg

ha^{-1})防治二化螟蟲及瘤野螟，以殺菌劑 40％加保扶水懸劑（carbofuran，800X，1.2 L ha^{-1}）及 50％維利黴素(Validamycin A, 50% S，1000X，1 L ha^{-1})防治紋枯病及其他害蟲。

試驗二在 2002 年的兩期稻作生育期間進行，另外選用 6-7 小區施以不等量氮肥，以產生不同生長表現及光譜變異之水稻族群，並以驗證試驗一建立之多元直線複迴歸模式之適用性。其中，一期稻作之插秧日期為 2 月 2 日，收穫日期為 6 月 18 日；二期作則於 8 月 8 日插秧，於 11 月 20 日收穫。每小區面積 500 m^2，除了氮肥施用量處理之外，其餘栽培管理皆如試驗一。氮肥用量於一期稻作分別為 0、30、60、90、120 及 150 kg ha^{-1} 等六種等級，二期作則為 0、30、60、90、120、150 及 180 kg ha^{-1} 等七種級差。植被反射光譜的量測及稻株生長性狀的調查，在水稻插秧一個月後定期實施，此時植被光譜將不致受到土表及灌溉水的干擾(預備試驗結果)。

生長性狀的調查係於測定光譜後取樣(每小區 6 叢)，調查包括鮮葉重與乾葉重、鮮稈重(葉加莖)與乾稈重、葉面積及株高等六項生長性狀。葉面積指數(leaf area index, LAI)係以單位取樣面積之累積鮮綠葉表面積的比值(m^2 m^{-2})表示。水稻族群植被反射光譜乃以田間攜帶式輻射光譜儀(spectroradiometer，model GER-2600，Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA)進行光輻射(radiance)的測定，將目標植被區之光輻射除以同波長之已知反射光譜特性的標準白板('Spectralon', Labsphere, Inc., North Sutton, NH, U.S.A.)反射光輻射(即參考值)來計算反射比。量測系統包括具有 10 度視角(field-of-view，FOV)掃描鏡頭的光譜儀、手提筆記型電腦、電池及電纜線等，光譜範圍 330-3600 nm，由電腦中內建的 GER 程式(GER-2600 User Manual, 1996)進行量測操作，並僅選取 350-2400 nm 波段的反射比光譜，以避免光譜兩端的硬體電磁干擾。系統安裝固定於距離植被約 5.8 m 之機動式高空作業車上垂直偵測植被反射光譜，每一塊試驗小區逢機量測 15 定點，每一定點預設為 4 次掃描之平均值，取 15 定點均值之平均值反射比曲線為該區代表。光輻射量測時間於上午十時至下午一時之間，選擇晴朗無雲時段偵測，以減少太陽入射角及遮雲的干擾。

試驗資料之統計分析係由 SAS 8.1 軟體(Statistical Analysis System version 8.1, 1998)及 Sigmaplot 2000 軟體(SPSS ASC BV, The Netherlands)運算，虛擬變數檢定(dummy-variable test)用於比較資料在期作間及年份間之差異性，反射光譜曲線之光譜特徵波段選取綠光波段之峰點(GREEN)、紅光波段之谷點(RED)及近紅外光波段之頂點(NIR)，再由其等之反射比計算組合比值 R_{RED}/R_{NIR} ratio、R_{GREEN}/R_{NIR} ratio、R_{RED}/R_{GREEN} ratios，以及標準差植被指數 NDVI(公式 $NDVI=(R_{NIR}-R_{RED})/(R_{NIR}+R_{RED})$。另光譜特徵之紅光臨界中點(red edge midpoint)為紅光臨界區間(red edge span)中間值之窄波段位置，後者係指介於 RED 至 NIR 的波段區間，而紅光臨界斜率則為紅光臨界中點的斜率。多元直線複迴歸(MLR models)分析先以 SAS 的 Collinearity Diagnostics 及 R-square Selection methods 篩檢合適的光譜特徵，再以 Step-wise Selection procedure 產生 MLR 模式。光譜特徵的多寡由決定係數(determination coefficients，R^2)大小來判別，經由選擇合適的 R^2 值來決定最適的光譜特徵。

三、結果與討論

在利用寬頻波段之光譜遙測進行農作物生長狀態監測的系統中，必須釐清光譜特徵波

段反射比及光譜指數與生長性狀的關係，並建立光譜遙測模式以從事農作物的精準管理。藉由這些特定目標的光譜特徵模式，或追蹤作物的生長、或預測作物的產量，達到快速而非破壞的定性與定量大面積作物現況的目的。本研究由近地面量測的水稻族群植被高解析反射光譜(350-2400 nm)，可以獲知光譜曲線在全生育期間的變化輪廓(資料未列出)。顯示出水稻反射光譜類似於一般綠色植物的光譜曲線模型，以紫外光及可見光的反射比較低，近紅外光的反射比較高，而在短波紅外光及中紅外光的變動與落差較爲劇烈。在可見光之中，反射比的波峰出現在綠光波段，波谷則分別落在藍紫光及紅光波段，如陳等(2001)之試驗結果。

水稻光譜曲線在常態環境下全生育期的變化呈現規則性波動，顯示光譜的改變受到內在生育進展及外在環境的雙重影響，稻株生長性狀亦復如此，無論期作或年份多爲凸形二次曲線趨勢(圖 1)，而不同年份之間存在變異。稻株外觀形態隨著生長發育在葉色、莖葉分佈及生殖器官演化上皆出現明顯的時空變化，當然將造成植被光譜的差異，這些現象反映出兩者之間的密切互動，也將會顯示出形態與光譜的因果關係。由圖之生長性狀表現，可以看出生長性狀在稻株近抽穗時期達到最高點，其後即扮隨成熟老化過程而逐漸下降。一般言之，生長性狀在抽穗前後出現高原期，隱示從營養生長期轉換至生殖生長期將有顯著的形態改變，稻株通常在步入生殖期前達到其生長的高峰，隨後即邁向生長衰退的老化期。這種形態的轉變文獻上有許多報告(Baret *et al.*, 1989; Wiegand *et al.*, 1991; Yang and Su, 1997, 1998; Yoshida and Ahn, 1968)，並且顯徵於光譜指數在生育期間的變化，如 Gilabert *et al.*(1996)指出玉米植被光譜計算的 NDVI 及 SAVI 兩項光譜指數，其凸形二次曲線變化正如生長性狀在生育期間的表現。可以預見將光譜特徵或光譜指數的曲線變化依照生長性狀的曲線趨勢，在生長最高點切割成營養生長相及生殖生長相，分別予以建立相關模式，將可能提高模式的相關性(Yang and Su, 1998)。

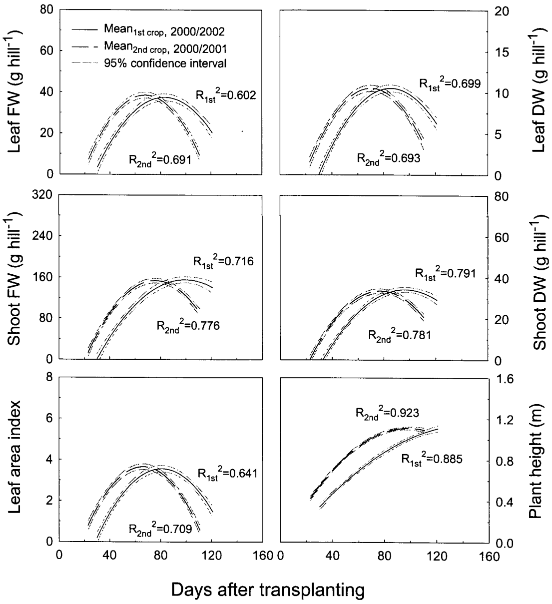

Fig. 1. Changes of growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002. The 95% confidence intervals of each growth parameters are included.

由於一、二期稻作的資料之間未呈現統計上的顯著差異(資料未列出)，乃將兩期作資料合併迴歸分析，以比較生長性狀與光譜指數、光譜特徵的關係。結果顯示，在調查的九種光譜指數及光譜特徵當中，部分指數及特徵與生長性狀的關係爲二次曲線，部分則爲直線關係。其中，營養生長時期的六項生長性狀與所調查的光譜指數及光譜特徵均呈顯著相關(資料未列出)，例如其等與 NDVI 爲指數型正相關(R^2>0.62)(圖 2A)，與紅光臨界斜率則爲直線型正相關(R^2>0.33)(圖 2B)。在生殖生長期

間，生長性狀與光譜指數及光譜特徵之間的關係較不密切，其等與綠光波段峰點反射比(R_{GREEN})、近紅外光波段頂點反射比(R_{NIR})及紅光臨界中點等無顯著相關(資料未列出)；除了株高之外，其等與 NDVI 之間為指數關係(R^2>0.46)，與紅光臨界斜率則為直線關係(R^2>0.13)(圖 3A 及圖 3B)。由此結果可知，光譜指數及光譜特徵較能夠在營養生長期反應出稻株的生長狀態，而在同時具有生長與生殖器官複雜形態的生殖生長期及老化走勢下，則不易敏感反應出稻株外觀的生長表現。據此，可利用這些迴歸模式檢視光譜指數及光譜特徵與生長性狀的關係，並以估測或監測水稻生育期間的生長行為。值得注意的是，非線性的關係將限制比值型(ratio-based)光譜指數的應用(Yang and Su, 1998)，尤其在臨界上限範圍將出現指數的飽和現象(Gilbert *et al.*, 1996; Yang and Su, 1998).

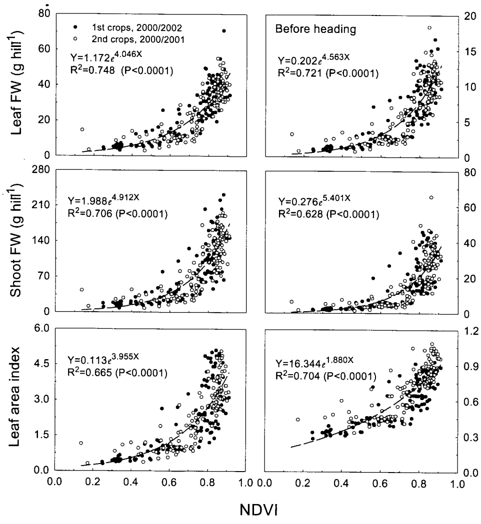

Fig. 2A. Correlations between growth parameters and NDVI before heading (in vegetative growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

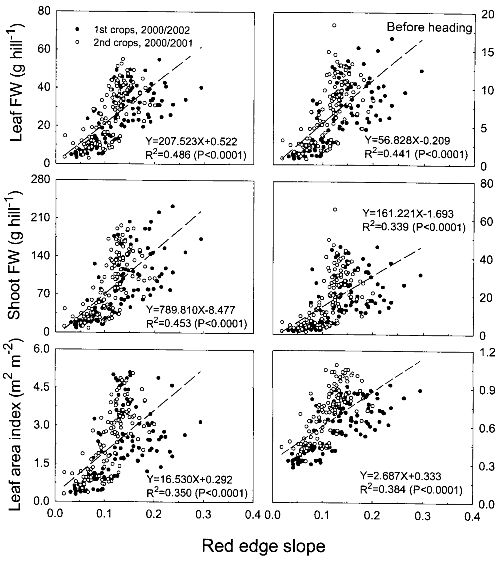

Fig. 2B. Correlations between growth parameters and red edge slope before heading (in vegetative growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

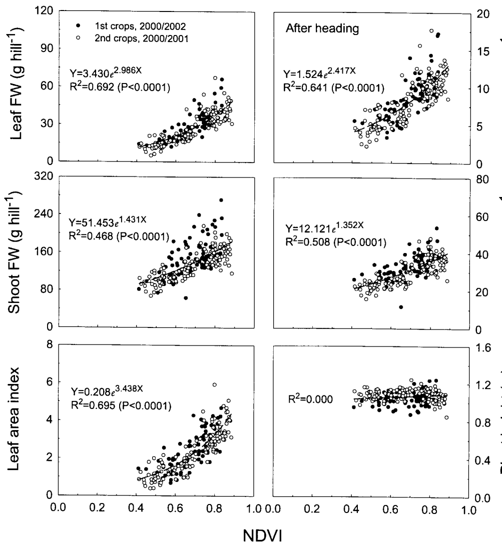

Fig. 3A. Correlations between growth parameters and NDVI after heading (in reproductive growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

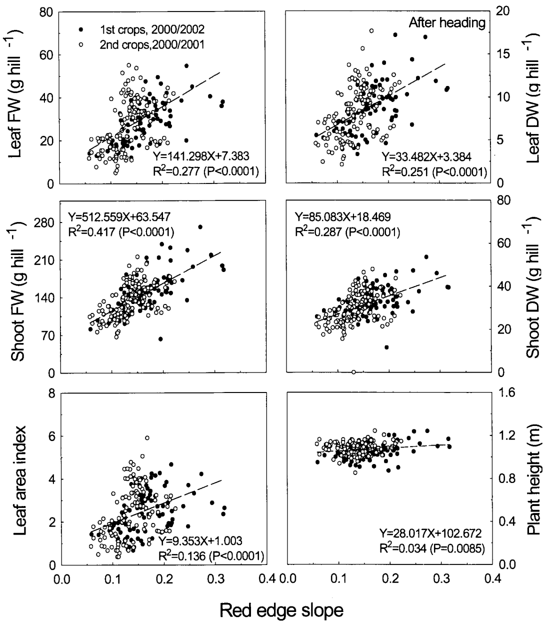

Fig. 3B. Correlations between growth parameters and red edge slope after heading (in reproductive growth phase) for rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

在過去光譜遙測技術發展的三十多年歷程中，以紅光及近紅外光波段反射比為計算基礎的光譜指數，曾被廣泛的應用於估測綠色植物的生育狀態 (Daughtry *et al.*, 1992; Wiegand *et al.*, 1990)。由文獻資料可知，光譜指數對於葉片的密度與生質量具有對應的變化，也受到環境及土壤背景的影響，同時因觀測角度及光源入射方向的不同而異(Gilabert *et al.*, 1996; Qi *et al.*, 1993; Rondeaus *et al.*, 1996)。本研究進一步發現，稻株抽穗前的均質營養組織使得植被幾何結構及色澤較為單純一致，抽穗後混合的營養與生殖器官及老化過程帶來色澤上的參差不齊，不僅將改變光譜指數與植被外觀物理徵狀原本相對應的密切關係，更將因為植被的趨於複雜而使得兩者關係轉為鈍感。

此外，文獻研究(Lawrence and Ripple, 1998; Shibayama and Akiyama, 1991; Thenkabail *et al.*, 2000; Wanjura and Hatfield, 1987)中亦顯示，組合多個光譜特徵波段反射比的多元複迴歸模式(MLR, multiple linear regression model)，可以改進單一波段反射比與生長性狀關係的敏感性。本研究於是亦進行複迴歸分析以篩檢合適的光譜特徵波段，藉由不同波段組合獲得的決定係數(R^2)高低來選擇光譜特徵數目(資料未列出)，並經共線性檢定後擬出可以接受的多元複迴歸模式，分別以估測不同的生長性狀。如表 1 所列，依照前述試驗結果將稻株生育切割成抽穗前期及抽穗後期兩大階段，並分別為不同年份，以獲得較佳的迴歸模式。除了抽穗後期的株高之外，其餘五項生長性狀均建立了特定的多元複迴歸模式(R^2>0.43)。而由於 MLR 模式的決定係數大於單一特徵波段及光譜指數模式的決定係數，顯示其等對於生長性狀的變異分佈具有較佳的估測，因此可以獲取較正確的生長資訊。由表 1 的結果也可看出，同期作且同生長階段採用的 MLR 模式所選取的光譜特徵波段可適用於六項生長性狀，惟其參數值有所不同。但是，適用於一期作的模式所包含的光譜特徵波段未必適用於二期作者。

Table 1. The best 2- or 4- variable linear regression models, before and after heading, for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv TNG 67) grown in the first and the second cropping seasons in 2000-2002.

Growth parameter	$Y_4=a+a_1R_{\lambda1}+a_2R_{\lambda2}+a_3R_{\lambda3}+a_4R_{\lambda4}$					R^2	P
	a	a_1	a_2	a_3	a_4		
Before heading (the vegetative growth phase)							
First crops, 2000/2002[†]							
Leaf fresh weight	17.62	-0.76	-0.44	4.42	-5.65	0.779	<0.0001
Leaf dry weight	5.33	-0.23	-0.13	1.29	-1.70	0.765	<0.0001
Shoot fresh weight	73.48	-5.69	0.44	12.22	-18.39	0.729	<0.0001
Shoot dry weight	17.86	-0.73	-0.70	4.74	-6.25	0.700	<0.0001
Leaf area index	2.07	-0.02	-0.16	0.68	-0.79	0.740	<0.0001
Plant height	60.97	-2.71	-0.41	4.72	-5.84	0.777	<0.0001
Second crops,2000/2001[‡ @]							
Leaf fresh weight	28.22	18.44	-20.16	2.44	-0.93	0.785	<0.0001
Leaf dry weight	8.54	6.37	-6.77	0.71	-0.28	0.756	<0.0001
Shoot fresh weight	107.06	86.26	-90.86	10.36	-5.00	0.825	<0.0001
Shoot dry weight	27.46	23.86	-24.67	2.52	-1.38	0.740	<0.0001
Leaf area index	2.38	1.68	-1.81	0.22	-0.07	0.790	<0.0001
Plant height	73.65	31.82	-33.39	3.76	-1.45	0.825	<0.0001
After heading (the reproductive growth phase)							
First crops,2000/2002[§]							
Leaf fresh weight	21.24	7.28	-4.57	-3.67	0.78	0.744	<0.0001
Leaf dry weight	6.91	2.61	-2.11	-0.64	0.23	0.732	<0.0001
Shoot fresh weight	96.83	2.16	1.71	-9.30	2.28	0.532	<0.0001
Shoot dry weight	28.31	6.09	-5.05	-1.08	0.50	0.534	<0.0001
Leaf area index	2.58	1.18	-0.89	-0.28	0.07	0.723	<0.0001
Plant height	98.19	-8.53	6.05	0.14	0.12	0.436	<0.0001
Second crops,2000/2001[¶]							
Leaf fresh weight	30.79	-3.02	0.52			0.734	<0.0001
Leaf dry weight	8.83	-0.73	0.13			0.706	<0.0001
Shoot fresh weight	120.60	-6.98	1.78			0.659	<0.0001
Shoot dry weight	27.78	-1.58	0.38			0.655	<0.0001
Leaf area index	3.13	-0.29	0.04			0.740	<0.0001
Plant height	102.67	0.14	0.14			0.046	0.0627

[†] $R_{\lambda1}$: reflectance at 541 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 878 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 1260 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 1590 nm.

[@] $R_{\lambda1}$: reflectance at 506 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 542 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 1255 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 1436 nm.

[§] $R_{\lambda1}$: reflectance at 510 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 541 nm, $R_{\lambda3}$: reflectance at 676 nm, $R_{\lambda4}$: reflectance at 823 nm.

[¶] $R_{\lambda1}$: reflectance at 670 nm, $R_{\lambda2}$: reflectance at 808 nm.

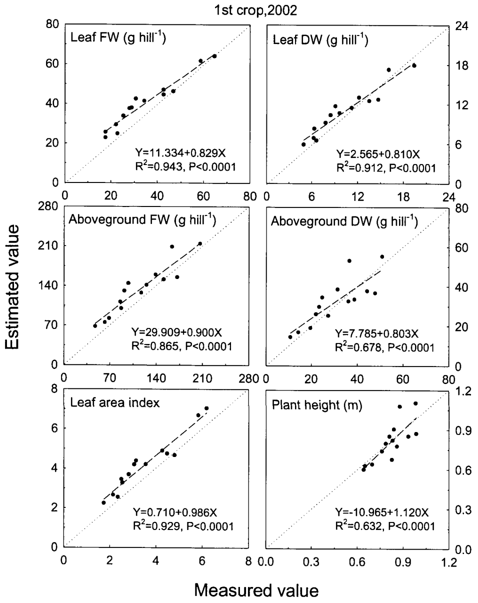

Fig. 4A. Validation of multiple linear regression models for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the first cropping season at the experimental farm of Agricultural Research Institute, COA, Wufeng.

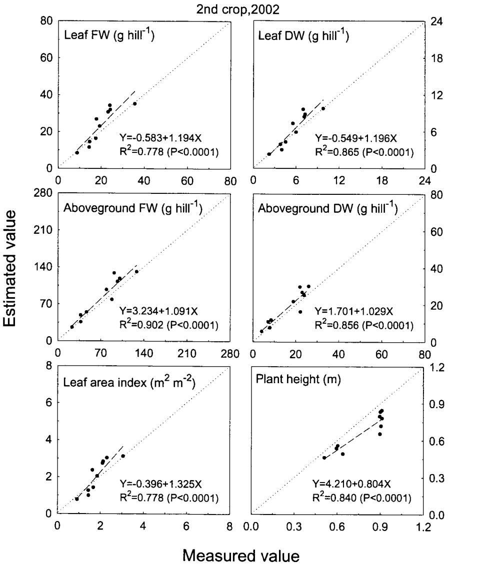

Fig. 4B. Validation of multiple linear regression models for growth parameters of rice plants (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) grown in the second cropping season at the experimental farm of Agricultural Research Institute, COA, Wufeng.

將另一次試驗的光譜特徵波段反射比輸入前述 MLR 模式，計算出的生長性狀估測值與其實際量取的實測值進行比較，發現於抽穗前的營養生長期得到的資料相關性甚高(圖 4A 及圖 4B)。顯示各生長性狀在營養生長期所建立的 MLR 模式適用性良好，可用於估測及追蹤水稻在兩期作的生育進展。相對而言，本研究也證實了利用多元直線複迴歸分析方法所建立的 MLR 模式，可適用於模式化水稻的生長表現，因而驗證光譜遙測技術應用於監測水稻生長的可行性。

四、結語

根據本研究結果，凡是作物地表上的植被(冠)在形態上(色澤及結構)的變化，能夠經由高解析反射光譜偵測出特定的光譜特徵波段，無論係正常的生育進展或因逆境造成的差異，均得以建立適當的迴歸模式，並反饋應用於生長估測。然而，任何模式都應該包含多年份的資料，容納環境的變異，才真正具有實際應用的價值。除此之外，本文也必須強調模式驗證的重要性，確認模式在不同條件下的適用性，才能夠讓原本解釋現有資料的關係式轉化成具有估測及預測功能的應用模式。

五、誌謝

本文研究承蒙行政院農業委員會和農委會農業試驗所計畫經費(89 遙測-4.1-糧-41(4)，90 農科-4.1.1-農-C2(01)，91 農科-5.1.3-農-C2(1))支持，謹以致謝。另農委會農業試驗所農場組對精準農業共同試驗田區的妥善管理，僅一併表示感謝。

六、引用文獻

陳榮坤、楊純明、張芳銘、蘇慕容。2001。水稻不同期作植被反射光譜之動態分析。中華農業氣象 8:77-92。

Anderson, G.L. and J.D. Hanson. 1992. Evaluating hand-held radiometer derived vegetation indices for estimating above ground biomass. Geocarto. Intl. 1:71-78.

Baret, F., G. Guyot and D.J. Major. 1989. Crop biomass evaluation using radiometric measurements. Photogrammetria 43:241-256.

Baret, F. and G. Guyot. 1991. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. Remote Sens. Environ. 35:161-174.

Barrett, E.C. and L.F. Curtis. 1982. Introduction to Environmental Remote Sensing. 2nd ed. Chapman and Hall, London. 352pp.

Blackburn, G. A. 1998. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: An evaluation of hyperspectral approaches. Remote Sens, Environ. 66:273-285.

Clevers, J.G.P.W. 1986. The derivation of a simplified reflectance model for the estimation of LAI. p.215-220. *In*:M.C.J. Damen, G. Sicco Smit and H. TH. Vers Tappe (eds.) Proceedings of Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management. August 1986, Balkema, The Netherlands.

Elvidge, C.D. and Z. Chen. 1995. Comparison of broad-band and narrow-band red and near-infrared vegetation indices. Remote Sens. Environ. 54:38-48.

Gates, D.M., H.J. Keegan, J.C. Schleter and V.R. Weidner. 1965. Spectral properties of plants. Appl. Opt. 9:545-552.

Gausman, H.W., W.A. Allen, V.I. Myers and R. Cardenas. 1969. Reflectance and internal structure of cotton leaves, *Gossypium hissutum* L. Agron. J. 61:374-376.

Gausman, H.W., W.A. Allen, D.E. Escobar, R.R. Rodriguez and R. Cardenas. 1981. Age effects of cotton leaves on light reflectance, transmittance, and absorptance and on water content and thickness. Agron. J. 63:465-469.

GER-2600 User Manual. 1996. Version 1.1. Geophysical & Environmental Research Corp., Millbrook, NY, USA.

Gilabert, M.A., S. Gandia and J. Melia. 1996. Analyses of spectral-biophysical relationships for a corn canopy. Remote Sens. Environ. 55:11-20.

Huete, A.R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). Remote Sens. Environ. 25:295-309.

Lawrence, R. L. and W. J. Ripple. 1998. Comparisons among vegetation indices and bandwise regression in a highly disturbed, heterogeneous landscape: Mount St. Helens, Washington. Remote Sens. Environ. 64:91-102.

Plant Protection Manual. 1994. Taiwan Provincial Department of Agriculture and Forestry, Nantou, Taiwan. 625pp.

Qi, J., A. Chehbouni, A.R. Huete, Y.H. Kerr and S. Sorooshian. 1994. A modified soil adjusted vegetation index (MSAVI). Remote Sens. Environ. 48:119-126.

Rondeaus, G., M. Steven and F. Baret. 1996. Optimisation of soil-adjusted vegetation indices. Remote Sens. Environ. 55:95-107.

Rouse, J.W., R.H. Haas, J.A. Schell, D.W. Deering and J.C. Harlan. 1974. Monitoring the vernal advancement and retrogradiation (greenwave effect) of natural vegetation. NASA/GSFC Type III report. Greenbelt, MD, USA. 371pp.

SAS Institute. 1998. SAS/STAT user's guide. Version 8.1. SAS Inst., Cary, NC, USA.

Shibayama, M. and T. Akiyama. 1991. Estimating grain yield of maturing rice canopies using high spectral resolution reflectance measurements. Remote Sens. Environ. 36:45-53.

Thenkabail, P. S., R. B. Smith and E. De Pauw. 2000. Hyperspectral vegetation indices and their relationships with agricultural crop characteristics. Remote Sens. Environ. 71:158-182.

Wanjura, D. F. and J. L. Hatfield. 1987. Sensitivity of spectral vegetative indices to crop biomass. Transactions ASAE 30(3):810-816.

Wiegand, C.L., S.J. Mass, J.K. Aese, *et al*. 1990. Multisite analyses of spectral-biophysical data for wheat. Remote Sens. Environ. 42:1-21.

Wiegand, C.L., A.J. Richardson, D.F. Escobar and A.H. Gerbermann. 1991. Vegetation indices in crop assessment. Remote Sens. Environ. 35:105-119.

Yang, C.-M. and M.-R. Su. 1997. Analysis of reflectance spectrum of rice canopy. (in Chinese) Chinese J. Agromet. 4:87-95.

Yang, C.-M. and M.-R. Su. 1998. Seasonal variations of reflectance spectrum and vegetation index in rice vegetation cover. p.574-593. In: Proceedings of the 3rd Asian Crop Science Conference. April 27-May 2, 1998. Chinese Society of Agronomy. Taichung, Taiwan.

Yoshida, S. and S.B. Ahn. 1968. The accumulation process of carbohydrate in rice varieties in relation to their response to nitrogen in the tropics. Soil Sci. Plant Nutr. 14:153-161.

Using Hyperspectral Reflectance Data to Modeling Rice Growth

Chwen-Ming Yang* and Rong-Kuen Chen
Division of Agronomy, Agricultural Research Institute, COA, Taichung, Taiwan, ROC
E-mail: cmyang@wufeng.tari.gov.tw

ABSTRACT

Experiments were conducted to study the seasonal changes of rice canopy reflectance spectra from near ground platform and to modeling rice (*Oryza sativa* L. cv. Tainung 67) growth from the related spectral characteristics and spectral indices. Reflectance spectra were taken by a field-portable spectroradiometer and growth parameters were measured after spectral measurements regularly during the first and the second cropping seasons in 2000-2002. Spectral indices of R_{RED}/R_{NIR} ratio, R_{GREEN}/R_{NIR} ratio, R_{RED}/R_{GREEN} ratio and normalized difference vegetation index (NDVI) were calculated from dynamic spectral characteristics GREEN, RED and NIR. Seasonal changes of the spectral characteristics, spectral indices, and growth parameters were either curvilinear or linear in both crops. It was found that growth parameters reached the maximum near heading when the vegetative growth climbed to the climax, and decreased after this stage when the plants grown toward maturity. Thus, modeling between spectral characteristics/indices and growth parameters may be improved by separating growing period into the pre-heading and post-heading phases. By the multiple linear regression (MLR) analysis, the best-2 or more variables MLR models were determined, which can be defined with an user-dependent coefficient of determination (R^2) for numbers of wavebands added to the models. The MLR models provided flexibility in choosing the individual narrow bands and improved the relationships to estimate plant growth.

Key words: Hyperspectral reflectance spectrum, Rice growth modeling, Multiple linear regression, Spectral characteristic, Spectral index.